

Lucrarea 15 (new 2023)

REDRESOARE CU COMUTAȚIE NATURALĂ ȘI FUNȚIONARE ÎN PATRU CADRANE (redresoare bidirecționale)

1. Introducere

Conform celor analizate și demonstrate în lucrările anterioare, un *redresor obișnuit, complet comandat cu tiristoare* (B2, M3, B6 etc.), poate să funcționeze doar în două cadrane ale planului electric tensiune de ieșire – curent de ieșire ($U_d - I_d$), respectiv în cadranele 1 și 4 (vezi Fig.15.1).

În cadranul 4 redresorul funcționează în regim de inverter. Are polaritatea tensiunii schimbată la bornele de ieșire ($U_d < 0$) în timp ce curentul se păstrează pozitiv prin acesta ($I_d > 0$). Tensiunea inversată este dată de o *sarcină activă R-L-E*, redresorul impunând doar căderea de tensiune de pe acesta prin unghiul de comandă $\alpha_{inv} > 90^\circ$. Pe baza relației: $I_d = (E - |U_{d\alpha(inv)}|) / \sum R = I_{fr}$ se reglează curentul I_d și implicit puterea vehiculată de convertor din partea de c.c. către partea de c.a. Astfel, sarcina trece în poziția unei surse, iar convertorul se comportă asemeni unui receptor de energie electrică deoarece puterea la nivelul sarcinii devine negativă: $P_d = U_d \cdot I_d < 0$.

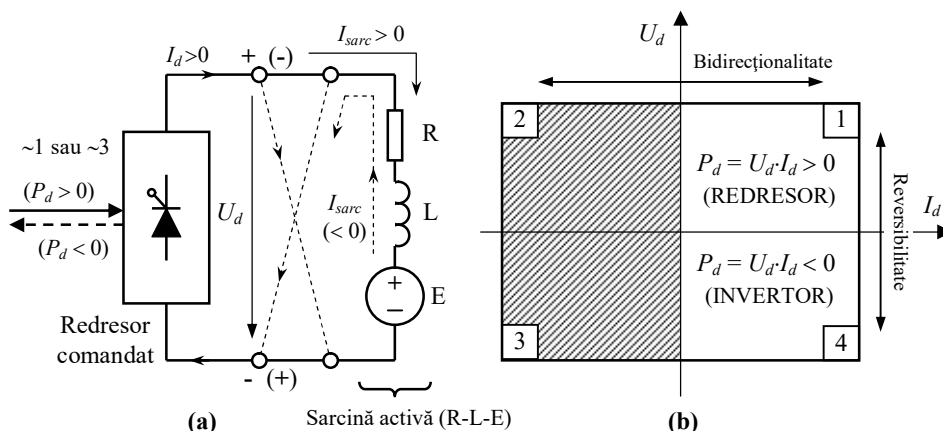


Fig. 15.1 (a) Trecerea unui redresor comandat în regim de inverter (din cadranul 1 în cadranul 4); (b) Planul electric: $U_d - I_d$.

Capacitatea convertorului electronic de putere de a inversa polaritatea tensiunii continue de la ieșire poartă denumirea de *reversibilitate* și poate avea loc prin trecerea din cadranul 1 în cadranul 4, așa cum sugerează săgeata din Fig.15.1(b). Cu toate că, un proces de reversibilitate poate avea loc și prin trecerea din cadranul 3 în cadranul 2, manevra nu este posibilă deoarece funcționarea convertorului în respectivele cadrane nu este posibilă.

Așa cum s-a descris pe larg în referatul Lucrării 9, trecerea din regim global de redresor în regim global de inverter poate fi realizată dacă sunt executate succesiv manevre de modificare a comenzii și cuplare inversă a motorului la redresor (inversarea conexiunii sau *contraconectarea*).

În majoritatea aplicațiilor care includ redresoare comandate cum ar fi acționările cu motoare de c.c., sisteme electronice de putere dedicate interconectării surselor de energie etc. interesează în mod deosebit capacitatea redresorului de a trece din cadranul 1 în cadranul 2 sau, altfel spus, capacitatea acestuia de a prelua un curent în sens invers, de a fi *bidirecțional*. De fapt, manevra de

inversare a conexiunii sarcinii active pentru a trece redresorul în regim de invertor realizează o trecere pentru sarcină din cadrantul 1 în cadrantul 2 deoarece se schimbă sensul curentului prin aceasta în timp ce polaritatea tensiunii la bornele ei rămânând aceeași (Fig.15.1.a $\rightarrow I_{sarc} < 0$). Pe de altă parte, redresorul își păstrează sensul curentului ($I_d > 0$), dar își schimbă polaritatea tensiunii ($U_d < 0$). *Prin manevra mecanică de contraconectare se face o adaptare între posibilitatea sarcinii active de a ceda energie prin schimbarea sensului curentului și posibilitatea redresorului cu comutație naturală de a prelua această energie prin schimbarea polarității tensiunii continue de la ieșire.*

Sunt aplicații unde precizia și rapiditatea sunt condițiile principale în funcționare cum ar fi, de exemplu, servoacționările la care timpii de răspuns trebuie să fie de ordinul sutelor de milisecunde. În asemenea aplicații sunt excluse manevrele mecanice de inversare a conexiunilor între motor și convertor, manevre care pot introduce întârzieri și de ordinul fracțiunilor de secundă. Pe lângă soluția modernă de utilizare a *chopper*-lor de 4 cadrane pentru **sistemele de acționare electrică reversibile** cu motoare de c.c., la puteri mai mari (kW÷zeci kW), există și soluția clasică de utilizare a **redresoarelor bidirecționale** care sunt, de fapt, **un ansamblu de două redresoare cu comutație naturală**, câte unul pentru fiecare sens al curentului. Un redresor A, care preia curentul de sarcină pozitiv, acoperă cadranele 1 și 4 din Fig.15.1(b), iar redresorul B, care preia curentul negativ, acoperă cadranele 3 și 2. Astfel, întregul **sistem electronic de putere** (A+B) se comportă asemeni unui singur redresor cu funcționare în patru cadrane permițând sarcinii de c.c. să funcționeze, la rândul ei, în toate cele patru cadrane, fără manevre de contraconectare. În consecință, dacă sarcina întregului convertor este un motor, putem vorbi de o **funcționare a ansamblului convertor-motor în patru cadrane**.

În funcție de cum sunt comandate cele două redresoare componente A și B din structura ansamblului bidirecțional, pot fi puse în evidență două clase mari de redresoare cu funcționare în patru cadrane:

- **Redresoare fără curent de circulație** – la care cele două redresoare componente sunt comandate separat. Astfel, când unul funcționează (este activ) fie în regim de redresor, fie în regim de invertor, celălalt este blocat și viceversa.
- **Redresoare cu curent de circulație** – la care cele două redresoare componente sunt comandate simultan cu unghiuri de comandă diferite (unul ca redresor și celălalt ca invertor), astfel încât să se respecte regula de conectare a surselor de c.c. în paralel referitor la tensiunile medii.

La rândul lor, redresoarele bidirecționale cu curent de circulație pot fi împărțite în două categorii, în funcție de modalitatea în care sunt alimentate:

- ✓ **Schema (montajul, structura) antiparalel** – la care cele două redresoare componente sunt alimentate de la o aceeași sursă de c.a. sau transformator;
- ✓ **Schema (montajul, structura) cruce** – la care cele două redresoare componente sunt alimentate de la surse de c.a. diferite, cum ar fi două transformatoare sau două secundare ale aceluiași transformator.

2. Redresoare cu funcționare în patru cadrane fără curent de circulație

Structura bidirecțională fără curent de circulație este realizată prin conectarea în antiparalel a două redresoare obișnuite, notate cu A și B, așa cum se prezintă în Fig.15.2. Sarcina activă, motorul de c.c. (M_{cc}), este legată la bornele comune ale acestora. Lipsa *curentului de circulație* vehiculat între cele două redresoare componente se datorează faptului că acestea vor lucra pe rând și întotdeauna unul din ele va fi blocat. Astfel, curentul este obligat să circule doar în bucla formată din convertorul activ și sarcină. Dacă acest din urmă convertor este comandat în regim de redresor, curentul de sarcină are semnificația unui curent de motor ($I_{sarc.} = I_{motor}$), iar dacă este comandat în regim de invertor curentul de sarcină are semnificația unui curent de frânare ($I_{sarc.} = I_{frânare}$). În Fig.15.2 sunt figurați cei doi curenți numai pentru funcționarea redresorului bidirecțional în cadranele 1 și 2 (traseele 1 și 2).

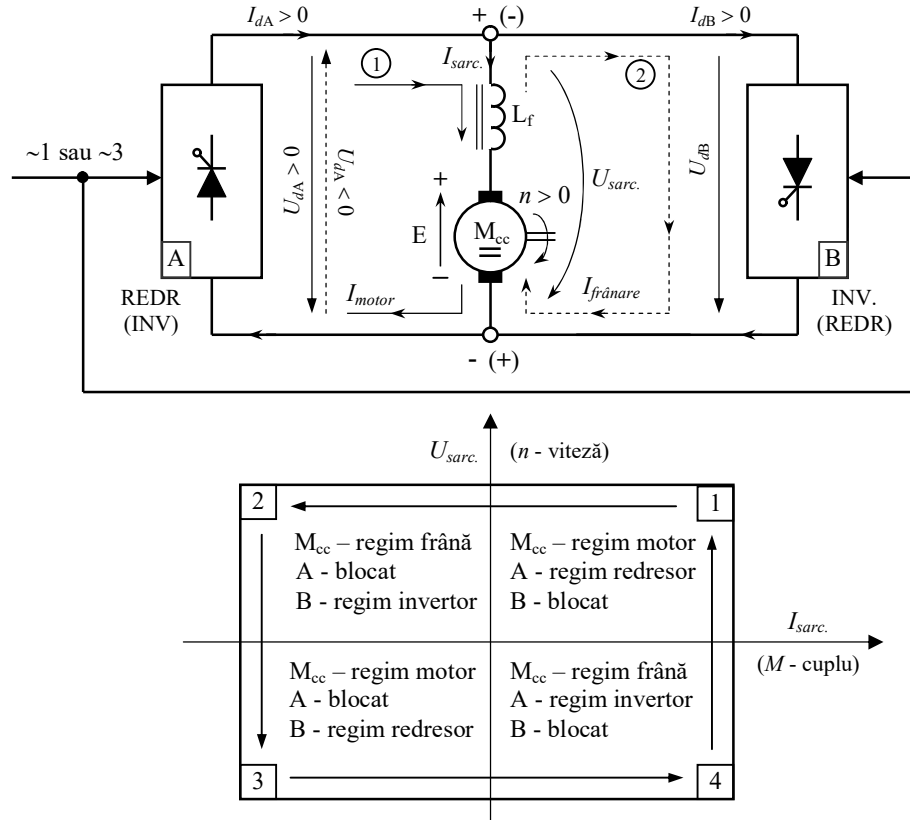


Fig. 15.3 Redresor cu funcționare în patru cadrane fără curent de circulație.

În **cadranul 1** este comandat convertorul A în regim de redresor cu unghiul $\alpha_{A(\text{redr})} < 90^\circ$, asigurând o tensiune continuă pozitivă pe sarcină:

$$U_{dA} = U_{sarc.} = U_{d0} \cdot \cos \alpha_{A(\text{redr})} = E + (\sum R) \cdot I_{sarc.} > 0 \quad (15.1)$$

unde: $E = k_e \cdot \Phi_{ex} \cdot n$ – este tensiunea electromotoare a mașinii de c.c.

$\sum R = R_L + R_a + \dots$ – este suma rezistențelor de pe traseul curentului $I_{sarc.}$
(a inductanței de filtrare L_f , a indusului motorului etc.)

$I_{sarc.} = I_{dA} = I_{motor}$ – este curentul de sarcină asigurat de convertorul A.

Pentru a frâna motorul, în **cadranul 2**, trebuie schimbat sensul curentului de sarcină, corespunzător traseului 2 al curentului $I_{frânare}$ din Fig.15.3, blocând funcționarea convertorului A și aducând convertorul B în regim de inverter. În acest scop, trebuie executate următoarele operații succesive:

- 1) Anularea curentului mediu prin motor ($I_{motor} = 0$) prin creșterea rapidă a unghiului $\alpha_{A(\text{redr})}$ spre valoarea de 90° ;
- 2) Blocarea redresorului A după ce curentul de sarcină a atins valoarea zero;
- 3) Așteptarea unui timp (**țimp mort**) până când toate tiristoarele redresorului A se blochează ferm;
- 4) Comanda convertorului B în regim de inverter cu un unghi de comandă care la început trebuie să respecte condiția $(180^\circ - \alpha_{A(\text{redr})}) \leq \alpha_{B(\text{inv})} \leq 150^\circ$.

Alegerea unghiului de comandă $\alpha_{B(inv)}$ necesar convertorului B pentru a debuta în regim de inverter, dar și descreșterea acestui unghi spre valoarea de 90° odată cu descreșterea vitezei motorului, trebuie făcute astfel încât curentul de frânare ($I_{frânare}$ – traseul 2 din Fig.15.2) să nu depășească valoarea maximă acceptată și de convertor și de motor (I_{max}):

$$I_{frânare} = I_d = \frac{E - |U_{d\alpha(inv)}|}{\sum R} \leq I_{max} \quad (15.2)$$

Trecerea ansamblului convertor-motor din cadranul 2 în **cadranul 3** poate fi realizată dacă se va scade progresiv unghiul de comandă α_B al convertorului B de la valori de inverter la valori de redresor. Scăderea progresivă a unghiului de comandă este necesară datorită modificării în mod continuu a tensiunii electromotoare pe durata regimului dinamic de inversare a sensului de rotație, de la valori pozitive la valori negative. Din motive de productivitate este de preferat ca schimbarea sensului de rotație al motorului să se facă în timpul cel mai scurt, ceea ce înseamnă menținerea cuplului electromagnetic cât mai apropiat de valoarea maximă posibilă pe întreaga durată a regimului tranzitoriu de reversare. Acest deziderat poate fi obținut practic doar prin utilizarea unei scheme de comandă și control prevăzută cu o buclă de reglare a curentului. Pe lângă reacția după curentul de sarcină, o schemă performantă de control automat va include și o reacție după viteza de rotație a motorului. Disponând de informațiile de curent (cuplu) și viteză (tensiune) structura de control poate localiza, în orice moment, în care cadran se află ansamblul convertor-motor și ce manevre trebuie executate automat pentru a trece acest ansamblu dintr-un cadran în altul atunci când acest lucru este cerut de o structură de comandă ierarhic superioară. Pe durata inversării sensului de rotație, regulatorul de curent va scădea controlat unghiul de comandă al convertorului B pentru a respecta condiția (15.2) atunci când $\alpha_B = \alpha_{B(inv)} > 90^\circ$ (regim de inverter) și condiția (vezi referat nr.7):

$$I_{motor} = I_d = \frac{U_{d\alpha(redr)} - E}{\sum R} \leq I_{max} \quad (15.3)$$

atunci când $\alpha_B = \alpha_{B(redr)} < 90^\circ$ (regim de redresor). În cadranul 3 mașina electrică funcționează în regim de motor la viteză negativă (tensiune negativă), iar curentul de sarcină ($I_{motor} < 0$) circulă pe traseul 2 din Fig.15.2. Puterea electrică este pozitivă la nivelul motorului și are semnificația unei puteri consumate pentru a fi transformată în lucru mecanic. Aceasta este asigurată de convertorul B care funcționează în regim de redresor.

Pentru a frâna motorul în **cadranul 4** se va bloca funcționarea convertorului B după care va fi comandat convertorul A în regim de inverter. Curentul de frânare corespunzător sensului invers de rotație este pozitiv ($I_{frânare} > 0$) și va circula pe traseul 1 din Fig.15.2. Trecerea din cadranul 3 în cadranul 4 se va face urmărind aceleași operații și condiții, descrise mai sus, în cazul trecerii din cadranul 1 în cadranul 2 al ansamblului convertor – motor.

Dacă motorul este frânat din sens invers de rotație până la oprire, poate fi repornit din nou în sens pozitiv de rotație. Aceasta este echivalent cu trecerea din cadranul 4 în cadranul 1 care poate fi realizată asemănător cu trecerea din cadranul 2 în cadranul 3, dar scăderea progresivă a unghiului de comandă are loc la convertorul A care va trece din regim de inverter în regim de redresor.

Pe baza celor discutate mai sus, se poate afirma că *redresoarele cu funcționare în patru cadrane fără curent de circulație* se remarcă prin:

- simplitatea schemei de forță;
- complexitatea schemei de comandă și a algoritmului de control pentru a executa strict toate operațiile de trecere dintr-un cadran în altul și a regla curentul pe durata regimurilor tranzitorii.

În consecință, ***redresorul bidirecțional fără curent de circulație este indicat a fi utilizat la puteri mari*** deoarece, în costul total al convertorului, ponderea structurii de forță este mult mai mare decât a schemei de comandă și control. ***La puteri mai mici sunt preferate redresoarele bidirecționale cu curent de circulație.***

3. Redresoare cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație

Și acest tip de redresor bidirecțional conține două redresoare obișnuite comandate, A și B, conectate în antiparalel – Fig.15.4. Spre deosebire de topologia redresorului bidirecțional fără curent de circulație, între cele două convertoare componente sunt intercalate două sau patru **inductanțe de limitare** (L_{lim}) în funcție de modul de alimentare a acestora, schema în cruce, respectiv schema antiparalel. Rolul inductanțelor este de a limita *curentul sau curenții de circulație* care iau naștere între convertoarele A și B ca o consecință a faptului că ambele sunt tot timpul active, un convertor ca redresor și celălalt ca inverter.

Prin **comanda simultană** a celor două convertoare componente A și B este eliminat timpul mort necesar pentru blocarea fermă a convertorului care a funcționat și activarea celui alt. Rezultă că *redresorul cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație este mai rapid decât cel fără curent de circulație* atunci când se dorește trecerea dintr-un cadran în altul. În plus, schema de comandă și control devine mai simplă deoarece nu mai este necesară evaluarea permanentă a variabilelor pentru a vedea în ce cadran se află ansamblul convertor – motor și nu mai sunt necesare toate manevrele, descrise în paragraful anterior, pentru a trece dintr-un cadran în altul. Pe de altă parte, structura de forță devine mai scumpă datorită inductanțelor suplimentare. Luând în considerare toate aceste aspecte se poate reafirma că, *redresoarele cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație sunt preferate în aplicații de putere medie și mică* (kW÷zeci kW).

Prezența convertoarelor A și B într-o buclă de circuit impune reguli stricte de comandă atunci când cele două structuri funcționează simultan, în scopul diminuării la minim a puterii electrice vehiculate între ele. Aceasta nu este o putere utilă deoarece ocolește circuitul de sarcină și încarcă suplimentar convertoarele. Eliminarea ei în totalitate este imposibilă, întrucât prin unghiul de comandă se poate interveni doar asupra valorii medii a tensiunii dintre convertoare. Având în vedere că unul din convertoare este comandat în regim de redresor și celălalt în regim de inverter, apar diferențe între tensiunile instantanee de la ieșirea acestora, diferențe care determină apariția unui **curent de circulație**. În lipsa unor elemente de circuit cu rol de limitare (inductanțele L_{lim}), acesta ar putea atinge valori de scurt circuit punând în pericol tiristoarele convertoarelor.

Pentru a reduce la minim curentul de circulație, tensiunea medie a convertorului A trebuie să fie egală și opusă în buclă cu tensiunea medie a convertorului B:

$$\begin{aligned} U_{dA} = -U_{dB} &\Leftrightarrow U_{d0} \cdot \cos \alpha_A = -U_{d0} \cdot \cos \alpha_B \Leftrightarrow \cos \alpha_A + \cos \alpha_B = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \alpha_A + \alpha_B = 180^\circ \end{aligned} \quad (15.4)$$

Relația (15.4) confirmă că unul din convertoare funcționează în regim de redresor și celălalt funcționează în regim de inverter. De exemplu, dacă :

$$\alpha_A = \alpha_{redr} < 90^\circ \Rightarrow \alpha_B = 180^\circ - \alpha_A = \alpha_{inv} > 90^\circ.$$

a) Schema (montajul) antiparalel

Specific montajului antiparalel la un redresor cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație este faptul că alimentarea convertoarelor componente A și B se face de la o aceeași sursă de tensiune alternativă, monofazată sau trifazată, așa cum se prezintă în Fig.15.4. Dacă cele două convertoare A și B sunt **redresoare cu punct median** (M_2, M_3) poate fi pus în evidență un singur curent de circulație care circulă în bucla formată din acestea. Pentru Fig.15.4 poate fi scris:

$$i_{c1}(t) = i_{c2}(t) = i_c(t) \quad (15.5)$$

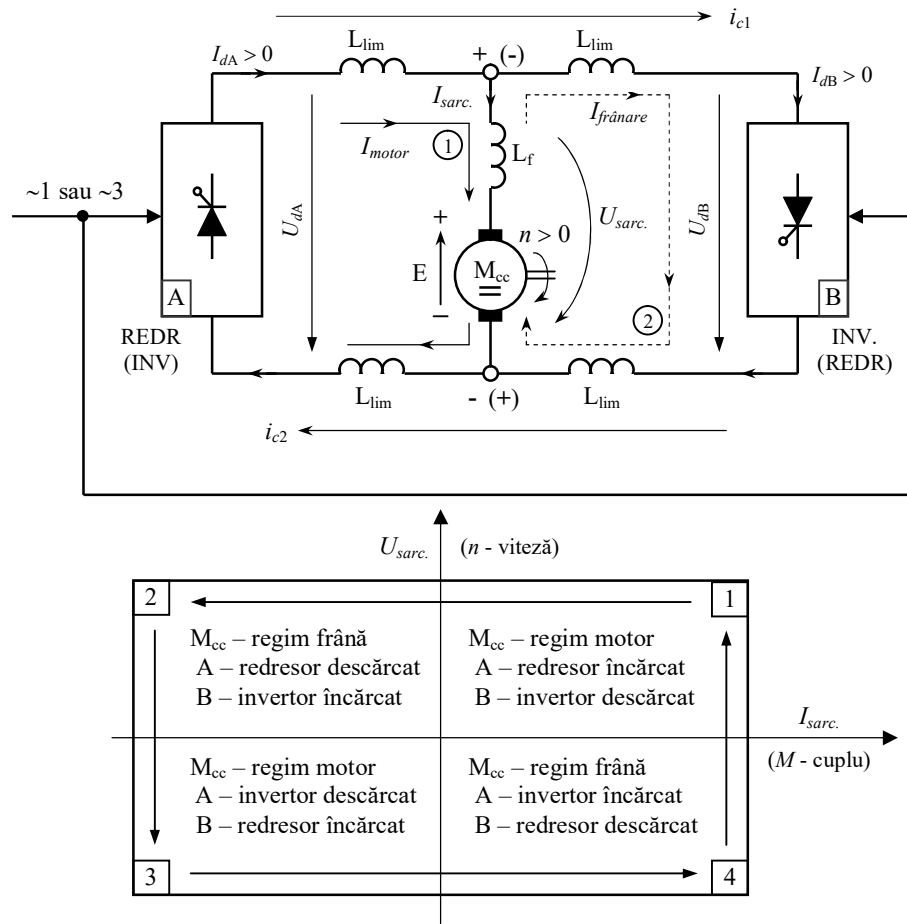


Fig. 15.4 Redresor cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație – schema antiparalel.

În Fig.15.5 este o prezentat un redresor bidirecțional cu un singur curent de circulație, schema antiparalel, constituit din două structuri trifazate \$M_{3A}\$ și \$M_{3B}\$. Unicul curent de circulație, menționat mai sus, este o consecință a diferențelor de potențial (tensiune de circulație \$\rightarrow u_c\$) care apar atunci când în structura celor două convertoare conduc tiristoare de pe faze diferite. În acest fel, la borna comună de alimentare a sarcinii sunt comutate simultan tensiuni diferite care ar provoca un scurt circuit dacă nu ar fi prezente inductanțele de limitare.

Atunci când ansamblul convertor – motor funcționează în cadrantul 1, convertorul A este un **redresor încărcat** deoarece asigură, așa cum se prezintă în Fig.15.4 și Fig.15.5, curentul de sarcină \$I_{sarc}\$ de pe traseul 1. Totodată, susține și curentul de circulație \$i_c\$ care apare între structura \$M_{3A}\$ și \$M_{3B}\$ întotdeauna cu sensul corespunzător traseului 2. Aplicând Kirchhoff se poate scrie:

$$i_{dA}(t) = i_{sarc.}(t) + i_c(t) = I_{sarc.} + i_c(t) \quad (15.6)$$

În relația (15.6) s-a considerat curentul de sarcină bine filtrat, motiv pentru care s-a aproximat valoarea instantanee cu valoarea medie: \$i_{sarc.}(t) \approx I_{sarc.}\$.

Tot în cadrantul 1 convertorul B este un **inverter descărcat** deoarece vehiculează numai curentul de circulație:

$$i_{dB}(t) = i_c(t) \quad (15.7)$$

Curentul i_c conține o componentă continuă I_c deoarece are numai un singur sens. Se recomandă ca inductanțele de limitare L_{lim} să fie astfel dimensionate, încât valoarea maximă a I_c să nu depășească 10% din valoarea nominală a curentului de sarcină. Având în vedere această valoare limitată este justificată denumirea de *convertisor descărcat* atunci când acesta vehiculează doar curentul de circulație. În funcție de valoarea inductanței L_{lim} și de unghiurile de comandă, curentul de circulație poate fi *neîntrerupt (permanent)* sau *întrerupt*. În Fig.15.5 este prezentat traseul curentului de circulație pentru combinația de tiristoare aflată în conducție (T_1, T_5).

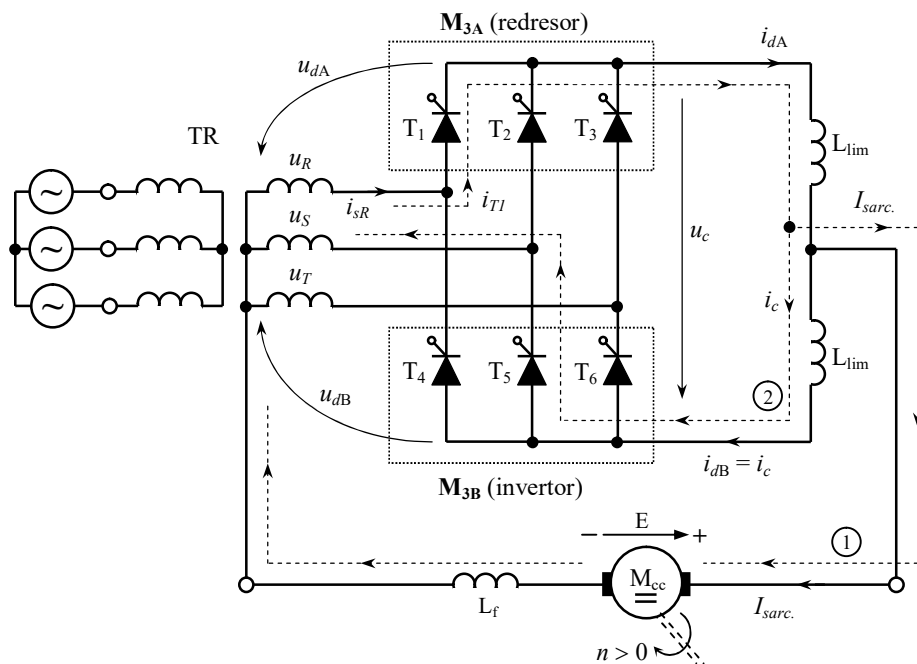


Fig. 15.5 Redresor bidirecțional cu curent de circulație – schema antiparalel constituită din două structuri trifazate M_{3A} și M_{3B} .

Pentru a avea o imagine asupra funcționării schemei antiparalel cu redresoare M3, în Fig.15.8 sunt prezentate formele de undă aferente atunci când M_{3A} este comandat ca redresor cu un unghi $\alpha_A = \alpha_{redr} = 30^\circ$ și M_{3B} este comandat ca invertor cu un unghi $\alpha_B = 180^\circ - \alpha_A = \alpha_{inv} = 150^\circ$, iar curentul de circulație este întrerupt. Din Fig.15.6 rezultă că tensiunea instantanee de circulație u_c este o combinație dintre tensiunile de ieșire instantanee ale celor două convertoare M_{3A} și M_{3B} pe intervalul în care există curentul de circulație:

$$u_c(t) = u_{dA}(t) - u_{dB}(t) \quad (15.8)$$

Pe baza relației (15.8) aplicată redresorului bidirecțional din Fig.15.5 și în gama de comandă $[30^\circ \div 60^\circ]$ pentru redresor, respectiv $[120^\circ \div 150^\circ]$ pentru invertor, forma de undă a tensiunii de circulație u_c conține trei pulsuri identice într-o perioadă a tensiunii de alimentare. Pulsurile prezintă salturi în momentul comutației tiristoarelor și lățimea lor este în funcție de valoarea unghiurilor de comandă. Pe intervalele dintre pulsuri tensiunea de circulație ia valoarea zero. Aceste intervale se micșorează pe măsură ce unghiul de redresor și unghiul de invertor evoluează spre 90° . Atunci când comanda celor două convertoare M_{3A} și M_{3B} se face cu $\alpha_{redr} \in [60^\circ \div 90^\circ]$ și $\alpha_{inv} \in [90^\circ \div 120^\circ]$, tensiunea de circulație va conține șase pulsuri, trei de amplitudine mai mare și trei de amplitudine mai mică. Curentul de circulație este determinat doar de partea pozitivă a pulsului tensiunii u_c .

Dacă inductanțele L_{lim} sunt suficient de mari există posibilitatea ca pe anumite intervale de comandă curentul i_c să fie neîntrerupt (permanent). Acesta este un efect benefic al prezenței curentului de circulație deoarece menține ambele convertoare într-o conducție continuă (regim de curent neîntrerupt), indiferent de valoarea curentului de sarcină. Totodată, prezența curentului de circulație

menține convertorul descărcat într-o stare activă, funcțională, pentru a fi pregătit în orice moment de a prelua curentul de sarcină (de motor sau de frână).

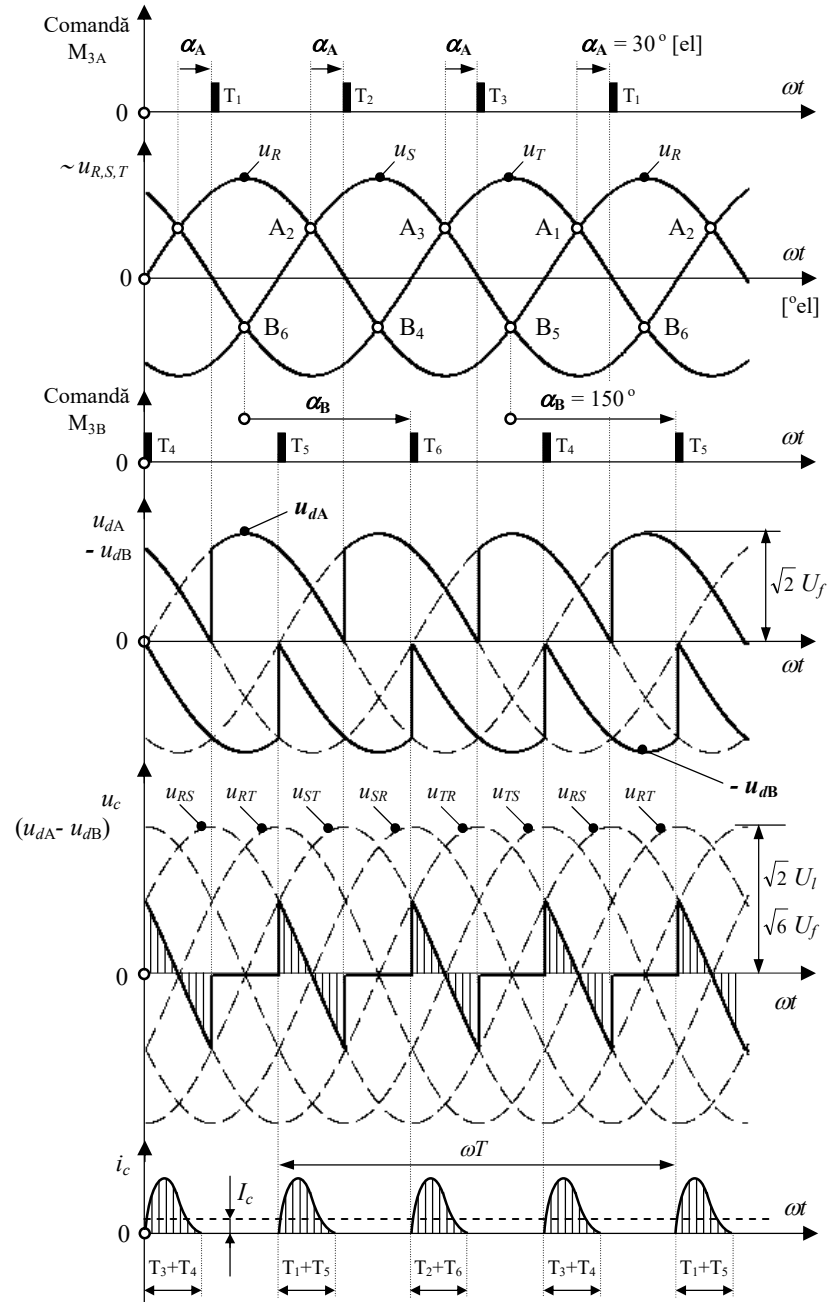


Fig. 15.6 Formele de undă ale tensiunii și curentului de circulație (curent întrerupt) corespunzătoare unui montaj antiparalel ($M_{3A} + M_{3B} \rightarrow \alpha_A = 30^\circ, \alpha_B = 150^\circ$).

Referitor la valoarea inductanțelor de limitare, în practică pot fi abordate două strategii:

- Calcularea unei valori minime suficiente pentru a limita curentul de circulație, atât în ceea ce privește valoarea sa medie, cât și în ceea ce privește valoarea sa de vârf în situația cea mai defavorabilă (unghiul de comandă la care amplitudinea pulsurilor tensiunii u_c este maximă). Dacă valoarea rezultată L_{lim} este insuficientă pentru a realiza și o filtrare eficientă a curentului de sarcină se adaugă o inductanță de filtrare (L_f) pe ramura sarcinii – vezi Fig.15.6.

- Calcularea unei valori acoperitoare, atât pentru limitarea curentului de circulație, cât și pentru filtrarea curentului de sarcină. În acest caz se renunță la inductanța L_f de pe ramura sarcinii.

Alegerea uneia dintre cele două variante se face în urma unui calcul economic pentru a vedea care este mai ieftină. Nu trebuie neglijat nici criteriul gabaritului sau a masei echipamentului în cele două situații posibile.

Dacă se preferă varianta a doua se impune un număr de două inductanțe de filtrare deoarece acestea trebuie să niveleze curentul de sarcină care, în funcție de cadrantul în care funcționează ansamblul convertor-motor, este dat fie de convertorul M_{3A} , fie de M_{3B} . În cazul primei variante este necesar un număr de două inductanțe de limitare, deoarece inductanța L_{lim} parcursă de curentul de sarcină poate intra în saturație, rămânând pentru limitarea curentului de circulație cealaltă inductanță.

b) Schema (montajul) cruce

Convertoarele A și B din structura schemei cruce a unui redresor cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație sunt alimentate de la două surse de c.a. separate galvanic. Varianta cea mai ieftină și mai simplă constă în utilizarea unui singur transformator cu două secundare distincte care alimentează redresoarele cu tensiuni strict egale – Fig.15.7. Există și varianta alimentării celor două convertoare prin intermediul a două transformatoare, fiecare cu un singur secundar. Sursa de tensiune alternativă, transformatoarele și convertoarele pot fi monofazate sau trifazate.

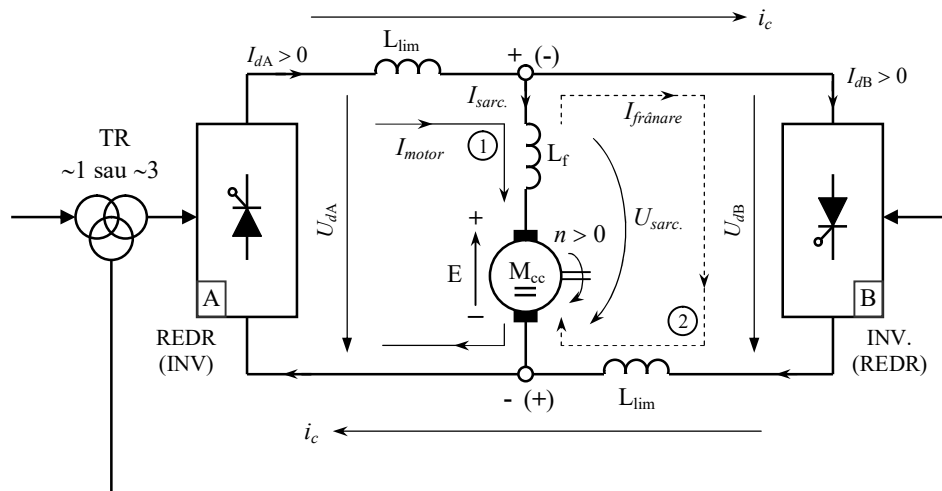


Fig. 15.7 Redresor cu funcționare în patru cadrane și curent de circulație – schema în cruce.

Indiferent de tipul celor două convertoare A și B (cu punct median sau în punte) la schema în cruce apare un singur curent de circulație i_c , a cărui buclă include sursele de c.a., convertoarele și barele de c.c. Fiind un curent de circulație unic, sunt necesare doar două inductanțe de limitare, poziționate ca în Fig.15.7. Acesta poate fi un avantaj al schemei în cruce în cazul în care pentru adaptarea tensiunilor se impune un transformator de alimentare, deoarece cheltuielile pentru adăugarea a unui secundar în plus pot fi mult mai mici decât prețul a două inductanțe de limitare, fiecare cu un circuit magnetic propriu. Se reduce, de asemenea, gabaritul și masa sistemului electronic de putere.

5. Standul de laborator

În laborator se va studia funcționarea unui redresor bidirecțional de patru cadrane și curent de circulație în varianta unei *scheme în cruce* la care cele două convertoare componente A și B sunt *redresoare trifazate cu punct median M3*. Spre deosebire de schema antiparalel din Fig.15.5, transformatorul trifazat TR are două secundare, iar cele două redresoare cu punct median M_{3A} și M_{3B} sunt alimentate separat de câte un secundar.

Întreg ansamblul: transformator trifazat, convertoarele A și B, inductanțele de limitare, inductanța de filtrare L_f , schemele de comandă (vezi Fig.15.7), aparate de măsură, butoane, comutatoare, lămpi de semnalizare etc. este plasat într-un tablou electric. Aparatele de măsură sunt clasice și indică valorile curenților I_{dA} , I_{dB} de la ieșirea redresoarelor componente, valoarea și sensului curentului continuu de sarcină ($I_{sarcin\grave{a}}$), valoarea tensiunii continue de la ieșirea ansamblului ($U_{sarcin\grave{a}}$), valorile puterilor active și reactive din partea de c.a. (absorbite de la rețea) etc. De asemenea, tabloul dispune de facilități pentru oscilografiera formelor de undă ale: u_{dB} , i_{dB} , i_c , $u_{sarc.}$, $i_{sarc.}$

Sarcina conectată la ieșirea redresorului bidirecțional este un motor de c.c., plasat pe un batiu înafara tabloului electric, având următoarele date de catalog: $U_n=110V_{cc}$, $P_n=1,7kW$, $n_n=1500\text{rot/min.}$ Reglarea simultană a unghiurilor de comandă pentru cele două convertoare componente A și B se face prin intermediul unui potențiometr dublu. Condiția: $\alpha_B + \alpha_A = 180^\circ\text{el.}$ este implementată automat de schema de comandă a redresoarelor. Trebuie avut grijă ca la pornirea schemei cruce, respectiv a motorului de c.c., potențiometrul de comandă să fie astfel poziționat încât tensiunea medie de ieșire să fie zero, cu alte cuvinte să fie realizată condiția: $\alpha_B=\alpha_A = 90^\circ\text{el.}$ În caz contrar, schema de comandă nu permite pornirea ansamblului.

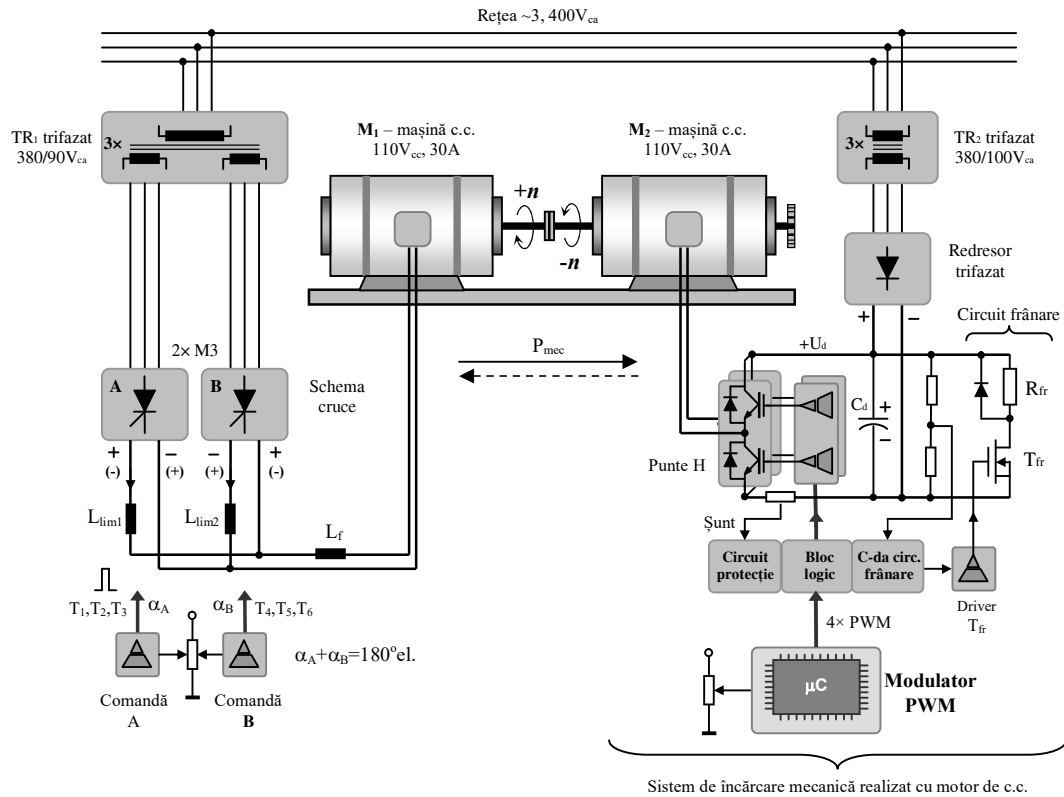


Fig. 15.7 - Structura standului de laborator pentru studiul unui redresor cu funcționare în patru cadrane (schema cruce).

Pentru a pune în evidență funcționarea, în regim stabilizat, a redresorului și a sarcinii în toate cele patru cadrane ale planului electric, respectiv mecanic, standul de laborator mai cuprinde un **sistem de încărcare mecanică** a motorului M₁ alimentat de redresorul bidirecțional. Acest sistem de încărcare include, ca parte principală, tot o mașină de c.c. identică cu M₁, notată cu M₂. Rotoarele celor două mașini sunt cuplate mecanic, iar ansamblul, montat rigid pe un suport (batiu), este bine echilibrat pentru a nu crea "bătăi" în timpul mișcării de rotație.

Cu ajutorul schemei cruce mașina M₁ poate să parcurgă toate cele 4 cadrane ale planului mecanic cuplu-viteză, putând fi rotită în ambele sensuri (+n, -n) și frânată din ambele sensuri.

În cadranele 2 și 4 motorul funcționează în așa numitul **regim de frânare**, atunci când *cuplul său electromagnetic se opune mișcării*. Acest regim poate fi obținut *static*, la viteză constantă, atunci când un alt element (altă mașină, sarcină potențială) antrenează motorul sau *în dinamică* atunci când mașina electrică se opune mișcării unor mase aflate în mișcare de rotație, solidare cu arborele mașinii, pentru a le încetini. Regimul de frânare la viteză constantă, fie într-un sens de rotație, fie în altul, poate fi obținut dacă mașina M_2 devine motor antrenând mașina M_1 cu o viteză mai mare decât ar rezulta din valoarea tensiunii $U_{d(\text{redr})}$ dată de unul din convertoarele A sau B, cel care funcționează în regim de redresor încărcat (în funcție de sensul de rotație). Într-o asemenea situație, celălalt convertor care funcționează în regim de inverter, se va încărca și va transfera energia de frânare în rețeaua de alimentare (**frânare cu recuperare de energie**). Situațiile în care cele două mașini M_1 , M_2 își schimbă rolul, din motor în generator și vice versa, sunt sugerate de sensul săgeților de circulație al puterii mecanice (P_{mec}), de la o mașină la alta, prin intermediul cuplajului mecanic dintre cei doi arbori.

Pe de altă parte, mașina M_2 , aparținând sistemului de încărcare, poate să capete rolul firesc de sarcină mecanică pentru motorul M_1 în cadranele 1 și 3 ale acestuia. În acest scop, M_2 este alimentat tot de un convertor de 4 cadrane, dar un **chopper în punte H** (convertor c.c. - c.c.) așa cum se prezintă în Fig.15.7. Este un convertor industrial care mai include un redresor necomandat cu diode, un filtru capacitiv, scheme de comandă și control dedicate scopului pentru care a fost conceput.

Pentru a fi utilizat în aplicația de laborator, a fost aleasă soluția ca echipamentul industrial să fie comandat din exterior cu ajutorul unui **modulator PWM** realizat cu un microcontroler. Acesta va furniza cele 4 semnale de comandă PWM necesare tranzistoarelor de putere din structura punții H și poate implementa atât strategia de comandă PWM cu o comutație bipolară a tensiunii la ieșire, cât și strategia de comandă PWM cu o comutație unipolară a tensiunii la ieșire. Pentru ajustarea factorului de umplere al semnalelor PWM se utilizează un potențiomtru acționat manual. Semnalele PWM sunt transmise driverelor ce comandă tranzistoarele prin intermediul unei scheme, realizate în exteriorul convertorului industrial, având rolul de a implementa funcții de protecție și de adaptare a semnalelor PWM, generate de microcontroler, la cerințele intrărilor de tip "optocuplor" ale driverelor integrate în schema industrială. Sunt două protecții implementate: o protecție la supracurenți a motorului și a punții cu tranzistoare, respectiv o protecție la creșterea tensiunii pe circuitul intermediar de c.c. U_d atunci când mașina electrică M_2 încarcă mecanic motorul M_1 , funcționând în regim de frânare, asemeni unui generator.

Prima schemă de protecție, la supracurenți, este realizată cu ajutorul unui șunt, a unui amplificator, a unor comparatoare și a unui circuit bistabil pentru memorarea stării de avarie. Atunci când curentul de ieșire al punții H, fie pozitiv, fie negativ, crește peste o valoare de prag, lucrează un comparator din cele două, bistabilul este trecut în starea de avarie și sunt blocate semnalele de comandă PWM, dezactivând convertorul c.c. - c.c. de 4 cadrane. Dacă se dorește deblocarea convertorului după ce a fost îndepărtată cauza supracurentului se poate apăsa din nou butonul de START. De asemenea, dacă se dorește blocarea voită a convertorului c.c. - c.c. în punte H se poate apăsa un buton de STOP.

A doua schemă de protecție, realizată de blocul "**C-dă circuit frânare**", permite sesizarea creșterii tensiunii U_d atunci când M_2 este în regim de frânare și energia de mișcare, transformată în energie electrică de mașină (generator), este preluată de convertorul în punte H și transferată, în sens invers, către circuitul intermediar de c.c. (preluată de condensatorul C_d). Pentru a evita creșterea tensiunii pe capacitatea C_d se comandă deschiderea tranzistorului de frânare T_{fr} care conectează în circuit, în paralel cu capacitatea, rezistența de frânare R_{fr} . Aceasta din urmă trebuie astfel dimensionată astfel încât să poată prelua rapid maximum puterii de frânare transmisă prin convertorul în punte H.

Pentru a nu depăși tensiunea nominală a motorului M_2 , puntea H se alimentează cu o tensiune continuă U_d obținută prin redresarea și filtrarea unui sistem trifazat de tensiuni preluat din secundarul unui transformatorului trifazat, notat în Fig.15.7 cu TR₂.

Standul de laborator, descris mai sus, permite un studiu mai larg al schimburilor energetice într-un sistem de acționare electrică cu motoare de c.c. alimentate în două variante: *cu redresoare comandate*, respectiv *convertoare c.c. – c.c. de patru cadrane*. **Primul transfer energetic** se desfășoară în următorul sens: putere electrică este preluată de la rețeaua de c.a. prin transformatorul TR₁ pentru a alimenta redresorul bidirecțional care alimentează în mod controlat motorul M₁. Acesta transformă puterea electrică în putere mecanică la arbore (P_{mec}) de unde este preluată de mașina M₂ care funcționează în regim de frânare (generator). Astfel, puterea este convertită din nou în putere electrică și, prin convertorul în punte H, este transferată, mai departe, capacității C_d . De aici este preluată de rezistența de frânare R_{fr} care transformă puterea electrică în căldură prin efect Joule-Lenz.

Al doilea transfer energetic este cel inversat, atunci când mașina M₂ devine motor și mașina M₁ frânează. În acest caz energia este preluată tot de la rețea, dar prin intermediul transformatorului TR₂, este redresată și filtrată după care puntea H cu tranzistoare o transferă mașinii M₂. Aceasta o transformă în energie mecanică și o transferă mașinii M₁ care devine generator transformând-o din nou în energie electrică. De aici, energia este preluată de unul din cele două convertoare A sau B (în funcție de sensul de rotație) care, funcționând în regim de inverter, o retransmite din nou în rețea prin intermediul TR₁. Evident, datorită randamentelor de conversie ale convertoarelor statice și ale mașinilor, nu mai ajunge înapoi în rețea aceeași cantitate de energie ca cea preluată prin TR₂.

5.1 Redresorul bidirecțional de patru cadrane: *schema cruce*

În Fig 15.8 se prezintă redresorul de 4 cadrane și curent de circulație, schema cruce, din laborator care alimentează motorul de curent continuu notat cu M₁ în Fig.15.7. Conform celor prezentate în secțiunea anterioară, convertoarele componente ale redresorului bidirecțional sunt de tip M3 comandat, notate cu M_{3A} și M_{3B}. Acestea sunt alimentate de la două secundare separate galvanic, notate cu 1 și 2, ale transformatorului "TR trifazat". Fiecare înfășurare secundară conține câte două secțiuni: Sec.1.1 și Sec.1.2, respectiv Sec.2.1 și Sec.2.2. Această modalitate de bobinare a secundarelor permite realizarea **conexiunii zig-zag** a acestora. *Prin utilizarea conexiunii zig-zag, într-o perioadă a tensiunii alternative, pe fiecare coloană a transformatorului, obținem două fluxuri magnetice de semne contrare care se anulează reciproc, chiar dacă redresoarele cu punct median M3 absorb curenți de fază, de la sursa trifazată, într-un singur sens.* Se evită, în acest fel, **premagnetizarea transformatorului** care ar conduce la supradimensionarea acestuia pentru o anumită putere electrică vehiculată de fiecare convertor M3.

Primarul transformatorului trifazat este alimentat de la rețea, respectând succesiunea fazelor (L₁, L₂ și L₃), prin intermediul unui contactor K_A a cărui bobină este integrată într-o schemă clasică de comandă cu buton de pornire (B_p), automenținere, buton de oprire (B_o) etc. Anclanșarea contactorului K_A prin apăsarea butonului B_p se face dacă în prealabil s-a selectat, prin intermediul unui comutator, tipul de schemă a redresorului (un singur M3, M3 cu diodă de descărcare M3D, schema cruce) și dacă potențiometru dublu care fixează **unghiul de comandă** pentru cele două convertoare M_{3A} și M_{3B}, se află în "**poziția de zero**" corespunzătoare situației: $\alpha_A = \alpha_B = 90^\circ$ el. Astfel, la pornire, motorul de c.c. se alimentează întotdeauna cu o tensiune zero, valoarea impusă de cele două unghiuri α_A , α_B : $U_{d\alpha A} = U_{d\alpha B} = U_{d0} \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos 90^\circ = 0$, așa cum se recomandă.

Comutatorul aflat pe panoul frontal aparținând dulapului în care este amplasat întregul echipament al redresorului bidirecțional – vezi imaginile din Fig.15.9 – poate selecta următoarele variante de studiu ale redresoarelor trifazate: 1 – convertor M_{3B} singular (K_B declanșat), 2 – convertor M3 cu diodă de descărcare M3D, (K_C anclanșat), 3 – **schema cruce**. Se observă, în schema, că prin neanclanșarea contactorului K_B rezultă o structură simplă de convertor M3 care să alimenteze motorul de curent continuu M₁. În funcționarea acestui convertor poate fi pus în evidență regimul de curent întrerupt (conducția discontinuă sau intermitentă) prin convertor dacă este anclanșat contactorul K_C care, mai departe, introduce dioda de descărcare D_d la bornele de ieșire a convertorului component M_{3B}.

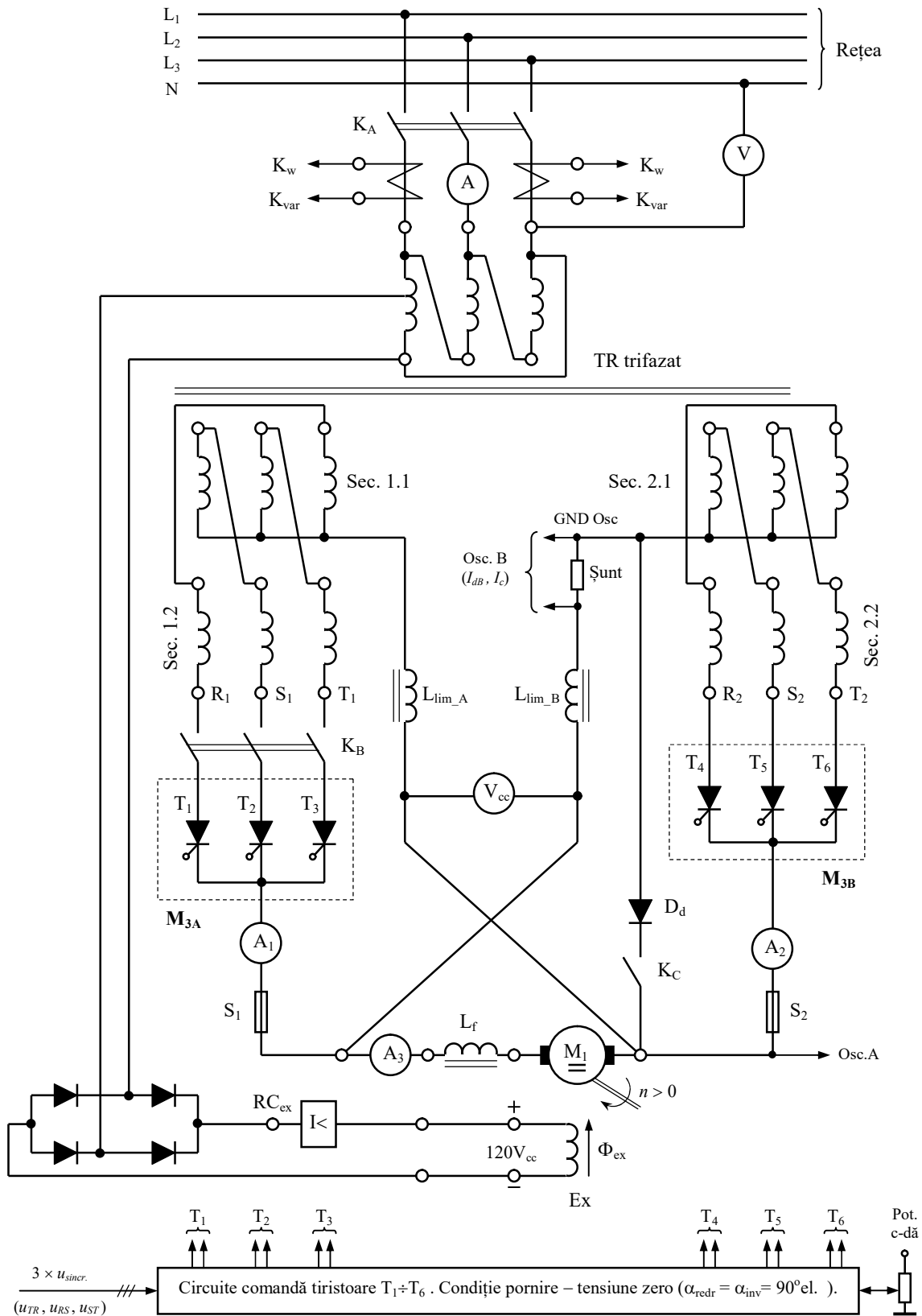


Fig. 15.8 Schema redresorului bidirecțional, schema cruce cu M3, din laborator.

Oscilografiera formelor de undă ale tensiunii de la ieșirea redresorului M_{3B} singular, respectiv ale curentului de ieșire (curentul de sarcină prin motor) poate fi realizată prin intermediul unor borne de măsură disponibile la exteriorul dulapului având legătură la șuntul înseriat cu inductanța L_{lim_B} , la punctele notate în schemă cu GND_{Osc} , Osc.A și Osc.B.

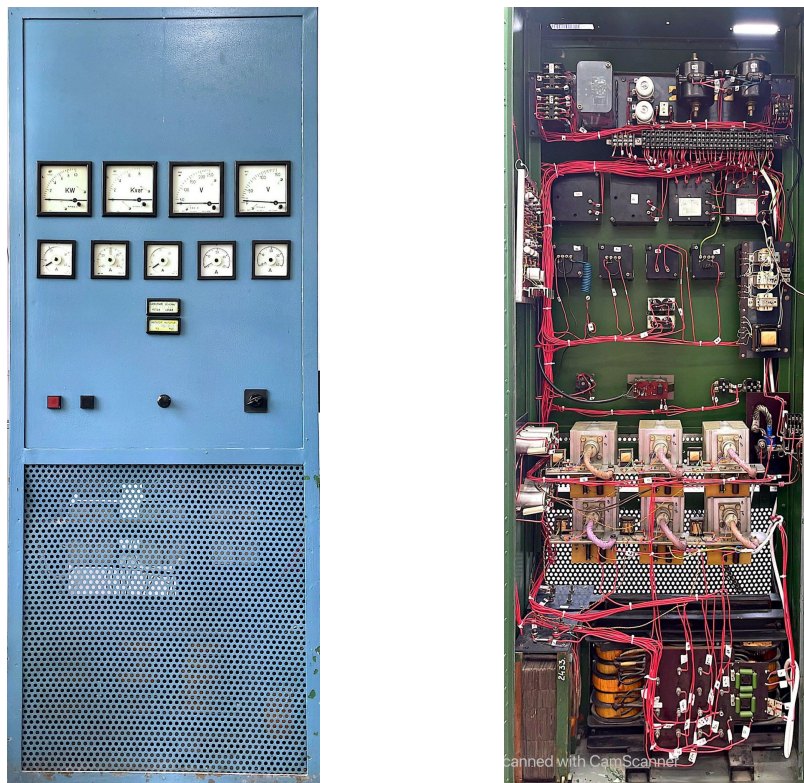


Fig.15.9 - Imaginea, frontală și interioară, a tabloului electric în care sunt montate elementele de circuit ale redresorului bidirecțional cu schema din Fig.15.8.

Alimentarea transformatorului TR de la rețea este monitorizată cu ajutorul unor aparate de măsură: voltmetrul V care măsoară tensiunea de fază, kilowattmetru (K_w) și kilovarmetru (K_{var}) care măsoară puterile electrice activă și reactivă, ampermetrul A care măsoară curentul de fază. Conexiunea înfășurărilor primare ale TR rețea este realizată în triunghi (Δ) pentru a diminua, pe cât posibil, armonicile de curent (poluarea armonică) introduse în rețea de redresoarele comandate M3. Kilowattmetru și kilovarmetru au în componența lor bobine de curent și de tensiune. Bobinele de curent sunt alimentate prin intermediul unor transformatoare de măsură (T_{mas1} și T_{mas2}) plasate pe 2 faze (L_1 , L_3).

Cele două convertoare componente M3 sunt conectate în opoziție (în antiparalel) la bornele motorului M_1 prin intermediul unor inductanțe de limitare a curentului de circulație, notate cu L_{lim_A} și L_{lim_B} . Curenții de la ieșirea convertoarelor M_{3A} și M_{3B} sunt măsurați cu ajutorul ampermetrelor A1, respectiv A2. Fiind aparate magnetoelectrice acestea măsoară curentul mediu care parcurge fiecare convertor în parte, fie suma dintre curentul de sarcină și curentul de circulație, fie numai curentul de circulație preluat de convertorul neîncărcat. Ampermetrul A3 indică valoarea și sensul curentului mediu de sarcină prin indusul motorului de curent continuu. Deoarece inductanțele L_{lim_A} și L_{lim_B} sunt calculate pentru a limita curentul de circulație acestea nu filtrează suficient curentul de sarcină, existând posibilitatea funcționării redresorului în regim de curent întrerupt atunci când motorul M_{cc} este descărcat. Prin urmare, în serie cu mașina de c.c. se poate conecta și o inductanță de filtrare notată în schemă cu L_f . Protecția la curenți de scurt circuit este realizată de siguranțele S_1 și S_2 plasate la ieșire convertoarelor A și B.

Prin rotirea potențiometrului dublu într-un sens sau în celălalt, pornind de la poziția de zero (aflată pe verticală), se trece convertorul M_{3A} în regim de redresor și M_{3B} în regim de inverter (sens orar) sau vice versa (sens antiorar). Astfel, se poate schimba sensul de rotație al motorului. Acest aspect poate fi evidențiat și de ampermetrul A_3 al cărui ac indicator poate devia la stânga sau la dreapta. În același timp, unul din cele două ampermetre A_1 sau A_2 va indica un curent de sarcină (care include și curentul de circulație), iar celălalt va indica doar curentul de circulație.

Turația motorului în regim stabilizat este proporțională cu tensiunea de la ieșirea convertorului care funcționează în regim de redresor, tensiune pusă în evidență de voltmetrul V_{cc} . Înfășurarea de excitație a motorului, notată cu "Ex", este alimentată cu o tensiune continuă obținută cu ajutorul unei punți monofazate necomandată conectată la o priză mediană a unei înfășurări primare a TR trifazat. Existența curentului de excitație este supravegheată permanent de bobina unui releu minimal de curent RCex (de control al excitației) având contacte în schema de comandă. Dacă înfășurarea de excitație nu este alimentată schema nu pornește sau dacă excitația dispăre în timpul funcționării transformatorul de forță este deconectat automat de la rețea. Astfel, este evitată apariția unui curent de scurt circuit prin indusul motorului de c.c. deoarece dispăre t.e.m a acestuia.



Fig.15.10 Imaginea standului de laborator pentru studiul redresorilor bidirecționale având ca sarcină de 4 cadrane un motor de c.c.

Pentru a pune în evidență, practic, trecerea redresorului bidirecțional prin toate cele 4 cadrane ale planului electric tensiune-curent, precum și trecerea motorului M_1 prin toate cadranele planului mecanic cuplu-viteză, se poate face următorul experiment în regim dinamic, fără a activa sistemul de încărcare mecanică realizat cu ajutorul mașinii M_2 . Se pornește schema cruce apăsând butonul B_p având grijă ca înainte să se poziționeze cursorul de reglare a unghiurilor cu indicatorul în sus. În caz contrar redresorul bidirecțional nu pornește. Este "poziția de zero", menționată anterior, aflată la mijlocul cursei potențiometrului. Prin rotirea acestuia în sens orar motorul accelerează în sensul pozitiv de rotație datorită trecerii convertorului component M_{3A} în regim de redresor încărcat. Suntem în cadrantul 1 al planului electric și mecanic. Un regim stabilizat de funcționare al ansamblului poate fi obținut la o orice viteză a motorului dacă este menținută o anumită poziție a potențiometrului care va impune unghiuri de comandă constante pentru convertoarele A și B:

$$\alpha_{A(\text{redr})} = 180^\circ - \alpha_{B(\text{inv})} < 90^\circ \text{el.} \Rightarrow U_{d\alpha A} = U_{d0} \cdot \cos \alpha_{A(\text{redr})} > 0$$

Dacă se dorește frânarea mașinii M_1 , în cadrantul 2 de la viteza pozitivă, se rotește potențiometrul în sens invers (antiorar). Astfel, imediat ce modulul tensiunilor medii date de convertoarele A și B scade sub valoarea t.e.m., corespunzătoare vitezei motorului, se amorsează un curent de frânare care va fi preluat de convertorul M_{3B} (pus în evidență de ampermetrul A_2). Prin

urmare, M_{3B} se încarcă în regim de inverter, iar M_{3A} aflat în regim de redresor se descarcă preluând doar curentul de circulație. Frânarea poate fi impusă până la oprirea motorului M_1 . Mai departe, dacă se continuă rotirea potențiometruului în sens antiorar, depășind poziția de zero, convertorul M_{3B} trece în regim de redresor încărcat, iar convertorul M_{3A} trece în regim de inverter descărcat. Motorul accelerează în sens invers de rotație și atât acesta, cât și redresorul bidirecțional în întregul său vor funcționa în cadranul 3. După un regim stabilizat de funcționare în acest cadran, se poate frâna motorul de la viteză negativă rotind potențiometrul în sens orar. În consecință, redresorul M_{3B} se descarcă și M_{3A} aflat în regim de inverter se încarcă (vezi ampermetrele A_1 și A_2), ansamblul trece în cadranul 4 unde energia de frânare este transferată înapoi în rețea, așa cum se întâmplă în cadranul 2. După oprirea motorului M_1 din sens invers de rotație, acesta poate fi rotit din nou cu o viteză pozitivă prin trecerea convertorului M_{3A} în regim de redresor încărcat și a convertorului M_{3B} în regim de inverter descărcat. Practic, atunci când potențiometrul a depășit poziția de zero prin rotirea sa în sens orar, se revine din nou în cadranul 1 după ce ansamblul redresor bidirecțional – motor de c.c. (M_1) a parcurs toate cele 4 cadrane în sens trigonometric,

5.2 Schema de comandă pentru tiristoarele redresorului bidirecțional

Standul de laborator include două scheme de comandă: o schemă de comandă pentru contactoarele ce alimentează sau configurează funcționarea celor două redresoare M_{3B} și M_{3A} , respectiv *schema de comandă în fază a tiristoarelor* aparținând redresoare componente. În Fig.15.11 se prezintă schema bloc a circuitului de comandă pentru tiristoarele celor două structuri M3.

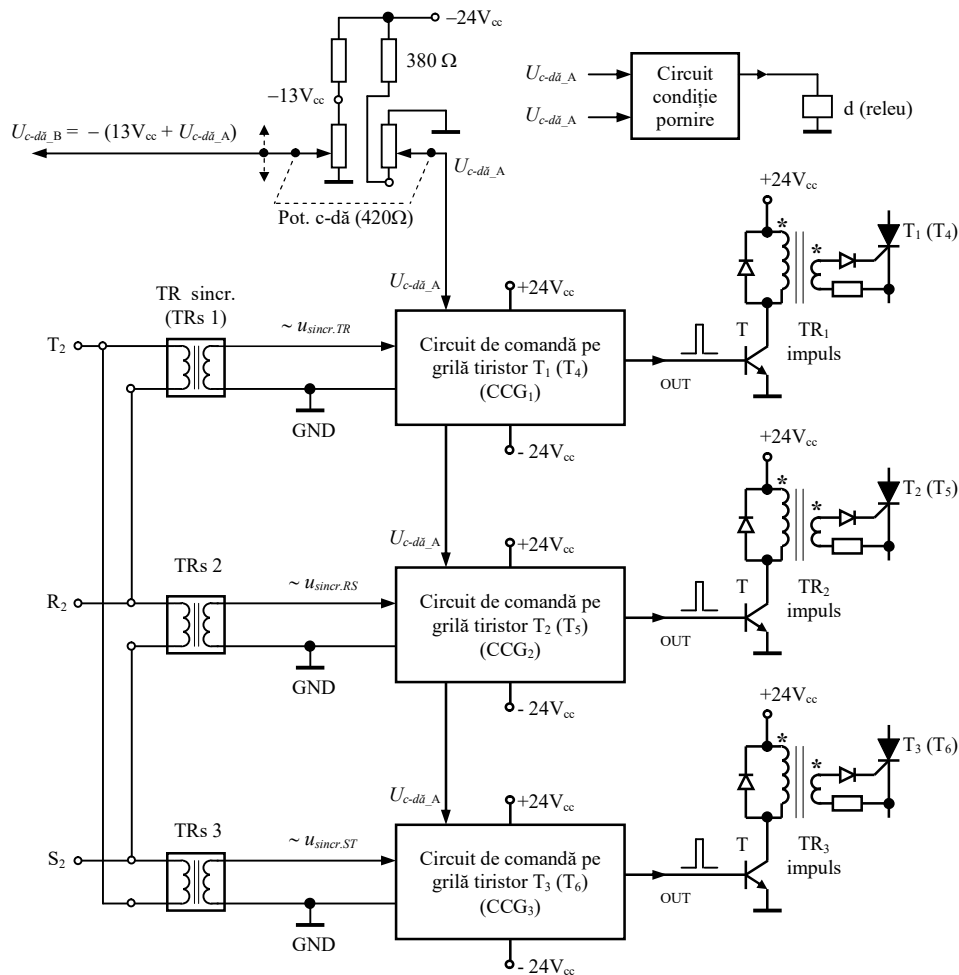


Fig. 15.11 Schema bloc a circuitului de comandă pentru tiristoarele structurilor M_{3B} și M_{3A} .

Schema din Fig.15.11 include și blocul care condiționează pornirea redresorului bidirecțional din "poziția de zero" a potențiometrului. Cele 6 tiristoare ale structurilor M_{3A} , respectiv M_{3B} , sunt comandate de 6 circuite de comandă pe grilă (CCG) sincronizate după anumite tensiuni de linie care trec prin zero în punctele de comutație naturală ale tiristoarelor redresoarelor M3. În figură, se prezintă un set de 3 circuite de comandă necesare pentru M_{3A} . Cele pentru structura M_{3B} sunt identice. **Transformatoarele de sincronizare** (TR_{S1} , TR_{S2} , TR_{S3}) sunt alimentate de tensiunile de linie u_{RT} , u_{SR} , u_{TS} preluate din secundarul 2 al transformatorului trifazat, de pe bornele de ieșire R_2 , S_2 , T_2 . Precizăm că tensiunile din primul secundar al transformatorului (la bornele R_1 , S_1 , T_1) sunt identice. Pe de altă parte, pentru a asigura separarea galvanică dintre circuitele de comandă și partea de forță având tensiuni ridicate, se folosesc și **transformatoare de impuls** (TR_{impuls}) care trimit impulsurile de comandă spre grila tiristoarelor. Aceste transformatoare de semnal sunt plasate cât mai aproape de tiristorul comandat pentru a evita o deschidere accidentală a acestuia. Legătura dintre schema de comandă și primarul transformatorului de impuls se face prin intermediul a două conductoare torsadate cu scopul a evita inducerea unor perturbații de tensiune.

Pentru a păstra relația (15.4) dintre unghiurile de comandă a celor două convertoare M_{3A} și M_{3B} : $\alpha_A + \alpha_B = 180^\circ$ el. se utilizează un potențiometru dublu (Pot. c-dă) alimentat în diagonală. Astfel, în cazul unui anumit sens de rotație al potențiometrului tensiunea de comandă ($-13 \div 0V_{cc}$) aplicată circuitelor de comandă aferente convertorului M_{3A} scade, iar la cele pentru M_{3B} crește și vice versa. Circuitul care supraveghează condiția de zero la pornirea instalației este realizat pe baza egalității celor două tensiuni de pe cursoarele potențiometrului dublu. Un comparator sesizează această egalitate și anclanșează un releu care permite, mai departe, anclanșarea contactorului principal K_A .

5.3 Circuit de comandă pentru tiristoare realizat cu componente discrete

Tiristorul este un dispozitiv semiconductor de putere cu terminal de comandă numit grilă sau poartă. Prin intermediul grilei poate fi comandată doar deschiderea dispozitivului cu ajutorul unui curent mic injectat între grilă și catod (dispozitiv comandat în curent). Prin urmare, trebuie avut în vedere faptul că, pentru a fi deschis, tiristorul are nevoie de un **circuit de comandă** care să-i furnizeze semnale de amorsare. În condițiile menținerii unei polarizări directe, după ce a fost deschis, tiristorul rămâne „agățat” în starea de conducție chiar dacă semnalul de comandă dispăre. Astfel, pentru a lucra în comutație în convertoarele statice, de fiecare dată după ce a fost deschis, tiristorul trebuie blocat cu o tensiune inversă periodică. Acesta este motivul pentru care tiristoarele sunt utilizate cu precadere în convertoarele alimentate cu tensiuni alternative (redresoare cu comutație naturală).

Pentru un minim al puterii de comandă, este indicată o comandă a tiristoarelor cu impulsuri de tensiune (curent) având o anumită amplitudine și durată. Rezultă că, rolul circuitelor de comandă pentru tiristoare constă în a furniza **impulsuri de comandă** la anumite momente pentru a bascula aceste dispozitive în starea de conducție - **comanda în fază a tiristoarelor**. În cazul structurilor complexe, cu mai multe tiristoare, se preferă un circuit comun de comandă care include la rândul lui circuite individuale pentru fiecare dispozitiv în parte. Aceste circuite pentru tiristoare sunt denumite, de obicei, ca **circuite de comandă pe grilă** (CCG) sau **dispozitive de comandă pe grilă** (DCG). În literatura de limbă engleză sunt referite ca *thyristor gate drive circuits* sau **gate-trigger circuits**.

Circuitele de comandă pe grilă pentru tiristoare sunt realizate cu ajutorul unor scheme electronice de mică putere, fie în variantă cu componente discrete, fie în varianta cu integrate specializate de comandă (ex. $\beta AA145$, $UAA145$), fie prin utilizarea unor circuite numerice gen microcontroler (μC). Realizarea schemelor de comandă exclusiv cu componente discrete se mai justifică în prezent doar pentru structurile de forță simple, atunci când nu se găsesc integrate specializate sau utilizarea acestora complică, respectiv scumpesc schema. Oricare ar fi varianta de implementare, o schemă de comandă modernă pentru un tiristor trebuie să realizeze funcții multiple, funcții care au fost descrise pe larg în referatul Lucrării nr. 3 de pe site-ul laboratorului. Pornind de la aceste funcții, blocurile funcționale ale acestor scheme sunt identice și sunt implementate asemănător. În Fig.15.12 se prezintă un exemplu de schemă pentru comanda unui tiristor, realizată cu elemente de circuit discrete (tranzistoare, rezistențe, condensatoare, diode etc.), care implementează următoarele funcții: de sincronizare, de seprare galvanică, de conversie tensiune-timp, de formare a impulsului și de protecție.

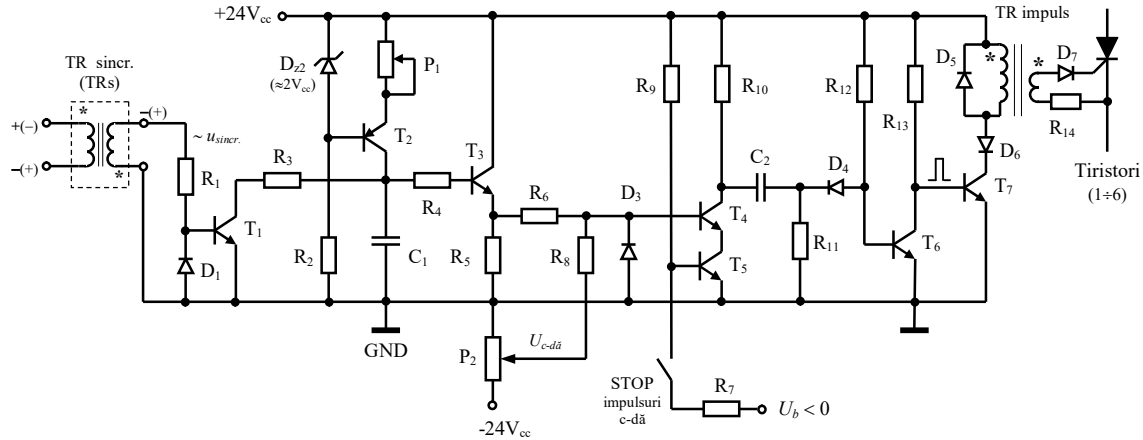


Fig.15.12 Circuit de comandă pe grilă pentru tiristoare realizat cu componente discrete.

Circuitul prezentat în Fig.15.12 este alcătuit din trei blocuri principale:

- blocul de formare a impulsurilor dinte de ferăstrău sincronizate cu rețeaua;
- blocul de comparare;
- blocul de formare a impulsurilor de comandă.

Tensiunea de sincronizare se aplică înfășurării primare a transformatorului de sincronizare (TRs). Tensiunea de comandă ($U_{c-dă}$) se prescrie cu ajutorul potențiometrului P_2 . Dacă prin întrerupătorul STOP se aplică o tensiune negativă U_b pe baza tranzistorului T_5 acesta este blocat și blochează, la rândul lui, generarea impulsurilor de comandă. În caz contrar, aceste impulsuri se regăsesc, cu separare galvanică, în secundarul transformatorului de impuls (TR impuls).

Pe durata alternanței pozitive a tensiunii aplicate primarului transformatorului de sincronizare, datorită modului în care este cuplat magnetic cu secundarul (vezi bornele marcate), tranzistorul T_1 este blocat. Terminalului de bază i se aplică o ușoară tensiune negativă (amplitudinea acesteia este limitată de pragul diodei D_1). Odată cu blocarea tranzistorului T_1 condensatorul C_1 se poate încărca cu ajutorul **generatorului de curent constant** realizat în jurul tranzistorului T_2 . Astfel, tensiunea de la borne condensatorului crește liniar în timp (tensiune liniar variabilă). Generatorul de curent constant împreună cu capacitatea C_1 formează așa numitul **generator de tensiune liniar variabilă** (GTLV), iar circuitul de comandă din Fig.15.12 mai este referit ca circuit de comandă pe grilă cu GTLV.

Pe durata alternanței negative a tensiunii de sincronizare, tranzistorul T_1 se deschide total (se saturează) și prin R_3 descarcă brusc condensatorul C_1 . Prin urmare, la bornele condensatorului se obține un semnal periodic „dinte fierăstrău” sincronizat cu rețeaua sau, mai exact, cu semialternața pozitivă a tensiunii alternative de sincronizare ($u_{sincr.}$). Semnal dinte fierăstrău este preluat de **repetorul pe emitor** realizat cu ajutorul tranzistorului T_3 care se remarcă printr-o *impedanță de intrare foarte mare*, neafectând în acest fel încărcarea liniară a condensatorului C_1 . Odată amplificat în curent de repetor, semnalul dinte de fierăstrău este aplicat, prin rezistența R_6 , pe baza tranzistorului T_4 cu rol de comparator. Tot pe baza acestuia este aplicată, prin rezistența R_8 și potențiometrul P_2 , tensiunea negativă de comandă $U_{c-dă}$.

La debutul semialternanței pozitive a $u_{sincr.}$ semnalul dinte fierăstrău are amplitudinea zero și tranzistorul T_4 este blocat. În momentul când tensiunea liniar variabilă a rampei semnalului dinte de fierăstrău depășește amplitudinea (modulul) tensiunii negative $U_{c-dă}$, tranzistorul T_4 se saturează rapid. Prin urmare, în colectorul tranzistorului T_4 se obțin impulsuri dreptunghiulare, fronturi negative în momentul comparației, care sunt derivate de către grupul C_2 - R_4 . Impulsurile negative corespunzătoare frontului descrescător al impulsului dreptunghiular sunt preluate de dioda D_4 și aplicate la intrarea amplificatorului format din tranzistoarele T_6 - T_7 . Tranzistorul T_7 alimentează primarul transformatorului de impuls care transmite impulsurile de comandă tiristorului cu separare galvanică.

Dacă modificăm amplitudinea tensiunii de comandă, se va modifica faza impulsurilor (unghiul de comandă) – vezi referat Lucrare 3, iar dacă modificăm constanta de timp a grupului de derivare C_2 - R_4 se va modifica durata impulsurilor. Amplitudinea impulsurilor aplicate pe grila tiristoarelor este dictată de raportul de transformare al TR impuls, iar amplitudinea curentului injectat în grilă este fixată de valoarea rezistenței R_{14} .

În ceea ce privește amplificatorul de ieșire T_6 - T_7 împreună cu transformatorul de impuls se mai pot face câteva observații. Puterea impulsului de comandă este mică, de ordinul a 2-3 W, ceea ce nu presupune un gabarit foarte redus al transformatorului de impuls. Totuși, pentru a transmite impulsuri de comandă în secundar cât mai aproape de forma dreptunghiulară, magnetizarea miezului magnetic al transformatorului nu trebuie să se apropie de cotul de saturație. În acest scop, puterea de calcul a transformatorului de impuls trebuie mărită corespunzător în funcție de durata maximă a impulsului.

6. Modul de lucru

1. Se va analiza modul în care, cu ajutorul unui singur redresor comandat cu tiristoare și utilizând operația de contraconectare, poate fi obținută funcționarea unei sarcini de c.c. în patru cadrane;
2. Se va analiza varianta obținerii unui redresor cu funcționare în patru cadrane (redresor bidirecțional) cu ajutorul a două redresoare comandate obișnuite legate în antiparalel;
3. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea redresoarelor bidirecționale fără curent de circulație;
4. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la funcționarea redresoarelor bidirecționale cu curent de circulație – schema antiparalel și schema în cruce;
5. Se va pune în funcțiune standul de laborator, schema cruce, și prin modificarea comenzii se va observa posibilitatea reglării vitezi (vezi indicațiile V_{cc}) și a rotirii motorului de c.c. M_1 în ambele sensuri. Se va observa indicațiile ampermetrului A_3 pe durata reversărilor;
6. Se va pune în evidență parcurgerea celor 4 cadrane de către redresorul bidirecțional în regim dinamic atunci când este rotit motorul în sens pozitiv, frânat din sensul pozitiv de rotație, rotit în sens invers și frânat din sensul negativ de rotație.
7. Vor fi analizate încărcarea și descărcarea convertoarelor M_{3A} și M_{3B} în regimurile de redresor și inverter pe baza măsurii curenților celor două convertoare componente cu ajutorul ampermetrelor A_1 și A_2 punând în evidență curentul de sarcină și curentul de circulație pe durata unei cicluri de reversare a motorului M_1 .
8. Se vor oscilografia formele de undă ale tensiunii u_{dB} , și ale curentului i_{dB} . Pentru sensul de rotație în cadranul 3 curentul dat de convertorul B va conține curentul de sarcină și curentul de circulație ($i_{dB} = i_{sarc.} + i_c$), iar pentru celălalt sens de rotație, în cadranul 1, i_{dB} va fi dat numai de curentul de circulație ($i_{dB} = i_c$);
9. Va fi blocat redresorul bidirecțional, se va pune în funcțiune sistemul de încărcare dat de al doilea motor M_2 și chopper-ul în punte H. Prin modificarea comenzii punții se va observa posibilitatea rotirii în ambele sensuri ale motorului M_2 . Se va fixa o anumită viteză pentru sensul pozitiv de rotație al standului, după care se vor bloca semnalele de comandă PWM ale tranzistoarelor convertorului c.c. – c.c. de 4 cadrane.
10. Se va reporni redresorul bidirecțional și se va fixa o viteză pozitivă, aproximativ de aceeași valoare cu cea data de *chopper* la punctul anterior.
11. Se vor debloca semnalele de comandă PWM ale *chopper*-ului și se va analiza schimbul energetic între cele două mașini electrice prin forțarea creșterii vitezei motorului M_2 , respectiv trecerea acestuia în regim de frânare prin scăderea vitezei acestuia modificând factorului de umplere al semnalelor PWM.